Eficacia de anclajes para refuerzos estructurales con materiales compuestos de matriz polimérica y cementosa



Efectiveness of anchors for structural retrofitting with composite materials of polymeric and cementitious matrices

Paula Villanueva-Llauradó, Adriana Cortez-Flores y Jaime Fernández-Gómez
Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Ingeniería Civil. Calle Profesor Aranguren, 3 – 28040 Madrid (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/8269 | Recibido: 27/01/2019 • Inicio Evaluación: 17/05/2019 • Aceptado: 17/10/2019

ABSTRACT

- Structural retrofitting of RC and masonry members with composite materials has achieved great popularity in recent years. Among these systems, a distinction can be made between composite materials with polymeric (FRP) and cementitious (FRCM) matrices; the former are more broadly employed, although the latter are generally acknowledged in the field of historic constructions, especially in brick masonry. Premature debonding has been pointed out as a critical failure mode in FRP systems, leading to the development of a range of anchorage techniques to delay or prevent debonding. FRCM, suffers from a different problem, which is its weak interaction fibres-matrix; for that reason, anchorage techniques originally conceived for FRP have been investigated with the aim of enhancing the performance of fibres-mortar interface in FRCM reinforcements. This paper collects main research papers for FRP and FRCM systems, and discusses the role of anchors depending on the matrix of the reinforcement.
- **Keywords:** Structural retrofitting, FRP, FRCM, Anchorage techniques, failure mode.

RESUMEN

Los refuerzos de estructuras de hormigón y de fábrica con materiales compuestos con fibras han alcanzado gran popularidad en las últimas décadas dentro del ámbito del refuerzo estructural. Entre estos sistemas cabe distinguir entre refuerzos con matriz polimérica (FRP) y cementosa (FRCM), siendo estos últimos menos conocidos, aunque más comúnmente aceptados para rehabilitación de estructuras históricas. El despegue prematuro es un modo de fallo crítico en los sistemas de FRP, lo que motivó la aparición de diversos sistemas de anclaje. Por su parte, el FRCM presenta una interacción fibras-matriz más débil, por lo que diversos sistemas anteriormente limitados al anclaje de refuerzos de FRP han comenzado a investigarse como una posible solución para mejorar el comportamiento de la interfaz fibras-matriz cementosa. Este artículo recopila las principales investigaciones realizadas con anclajes en refuerzos FRP y FRCM, y analiza los modos de fallo presentes en la literatura y el tipo de contribución efectuada por los anclajes en FRP y FRCM.

Palabras clave: Refuerzo estructural, FRP, FRCM, sistemas de anclaje, modo de fallo.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas ha crecido el interés por prolongar la vida útil de las estructuras de hormigón armado, de fábrica y de madera. La importancia de la durabilidad ha llevado a distintas estrategias para preservar las estructuras de obra civil y edificación, que pueden clasificarse en dos grandes grupos en función del tipo de intervención a realizar: reparación de estructuras dañadas, restableciendo algunas propiedades pérdidas o para preservar la integridad o funcionalidad de la estructura; y refuerzo, el cual puede precisarse para hacer frente a un nuevo estado de cargas, para adaptar la estructura a la normativa vigente o para compensar la pérdida de resistencia de algunos de sus elementos [1,2].

La necesidad de reforzar estructuras ha resultado en el desarrollo de diversas tecnologías de refuerzo. Tradicionalmente, dichas tecnologías han consistido en cosidos, recrecidos de mortero y hormigón, y diversos sistemas con elementos metálicos. En la década de 1980 surgen los primeros refuerzos con materiales compuestos con fibras de elevada resistencia (vidrio, aramida y carbono) y matriz polimérica (principalmente epoxi), materiales anteriormente limitados a aplicaciones aeroespaciales e industriales; desde un principio se señalan como principales ventajas de estos materiales: elevada resistencia y relación resistencia/peso, facilidad de aplicación, y mejor durabilidad en comparación con los refuerzos de acero [2]. Los polímeros reforzados con fibra han conseguido en las últimas tres décadas una considerable expansión como refuerzos exteriores e internos de estructuras de hormigón y, aunque en menor medida, de fábrica de ladrillo y piedra [3]. El material suplementario trata los elementos que pueden reforzarse con FRP.

Las matrices cementosas surgen como una alternativa para combatir estas desventajas de las resinas poliméricas. De esta forma, aparecieron los refuerzos de mortero reforzados con fibras (FRCM), que derivan de los hormigones con fibras, pero empleando fibras de gran longitud como en el FRP, y para usos similares (confinamientos, refuerzos a flexión y cortante, y mejora de la resistencia frente a sismo) [4]. A diferencia del FRP, que puede venir laminado de fábrica, en los refuerzos de FRCM siempre se aplica la matriz directamente en el momento de la adhesión al soporte, con laminación en húmedo de las fibras en forma de mallas o tejido. Junto con las fibras de vidrio, carbono y basalto, que actualmente se utilizan ampliamente en refuerzos de FRP, la tecnología de los refuerzos de matriz cementosa ha incorporado fibras de altas prestaciones como el polybenzoxazole (PBO), caracterizado por una muy elevada resistencia a tracción con un módulo elástico

más bajo que el de la fibra de carbono [5–7]. Como consecuencia de su mayor ductilidad, el FRCM es especialmente popular para paños de fábrica [4], y estructuras abovedadas [8,9].

Recientemente se han publicado investigaciones que comparan la eficacia de refuerzos de FRP y FRCM,[3,10]. Estas investigaciones indican que los refuerzos con FRP alcanza unos incrementos de resistencia del orden de un 40-50% superiores a los refuerzos con FRCM, principalmente como consecuencia de las diferencias en el modo de fallo observado en uno y otro sistema. Una comparativa interesante es la realizada por [10] para refuerzos a cortante, señalando que el FRCM presenta peor comportamiento en términos de carga última pero mejor en términos de ductilidad, e indicando que la eficacia de ambos sistemas está fuertemente condicionada por la configuración geométrica del refuerzo.

2. ADHERENCIA DE LOS REFUERZOS DE FRP Y FRCM AL SOPORTE

2.1. EL FENÓMENO DEL DESPEGUE DE LOS REFUERZOS DE FRP

El despegue prematuro del soporte es el modo de fallo más limitante en el diseño de refuerzos de FRP. Por ello, se han realizado numerosos estudios para la caracterización de la resistencia de adherencia en la interfaz FRP-soporte, tales como los realizados para refuerzos de hormigón por [11–14] y los que investigan la adherencia de la resina epoxi a soportes de fábrica, tales como [15–17].

De la literatura existente sobre el despegue de los refuerzos de FRP puede concluirse que la resistencia a despegue queda definida por la resistencia a tracción del soporte, la cual determina la tensión máxima de adherencia que provoca el fallo adherente (fallo cohesivo en el propio soporte, a milímetros de la superficie de adherencia). En el fenómeno del despegue también participan propiedades tales como el módulo elástico y espesor del refuerzo, y el ratio ancho del refuerzo/ancho del soporte. Todos estos aspectos suelen integrarse en los modelos de cálculo que predicen la máxima resistencia de adherencia del FRP, entre los que cabe destacar [13,18]. De igual forma, existe consenso en la comunidad científica en lo referente a la existencia de una longitud efectiva de transferencia de tensiones, más allá de la cual no se consigue mayor resistencia de adherencia entre el refuerzo y el soporte [12]. Sin embargo, proporcionar una longitud adherida mayor a la efectiva sí se ha relacionado con un incremento de la ductilidad, al concatenarse el fallo adherente en distintos puntos del refuerzo.

Las actuales guías de diseño y normativas tales como la italiana CNR-DT 200 [19], la inglesa TR55 [20] o la americana ACI 440.40 [21] establecen niveles aceptables de deformación a tracción del FRP, con objeto de impedir alcanzar la resistencia de adherencia y por tanto el fallo a despegue. Estos límites son cercanos al 10-25% de la resistencia a tracción del material compuesto, desaprovechando las propiedades mecánicas del material.

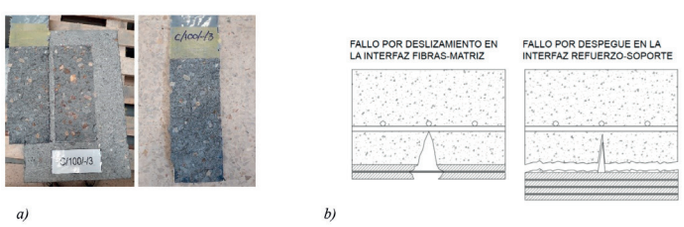


Fig. 1. Degradación de la adherencia en FRP (a) y modos de fallo frecuentes en FRCM (b)

La limitación del fallo por despegue en la eficiencia de los refuerzos de FRP ha llevado a la aparición de diversas propuestas de sistemas de anclaje en las últimas dos décadas [22,23].

2.2. MECANISMOS DE FALLO EN REFUERZOS CON FRCM

Para el FRCM, el estado del conocimiento en cuanto a sus modos de fallo es bastante más limitado, en parte por tratarse de una tecnología de más reciente incorporación a la construcción y en parte por la diversidad de composiciones de la matriz y tipos de fibras, que resulta en una mayor complejidad de comportamiento.

La respuesta de los materiales compuestos en estado de tracción o flexotracción suele caracterizarse por una primera rama elástica, en la que la matriz no está fisurada, seguida de una rama con fisuración progresiva del mortero que finaliza en rotura de las fibras o en despegue de las fibras.

El fenómeno del despegue no es análogo al producido en el FRP, ya que la superficie de fractura en refuerzos de FRP prácticamente siempre se produce en el soporte, de forma cohesiva. Por su parte, entre refuerzos de FRCM y soportes de fábrica se producen distintos mecanismos de despegue, según se recoge en [24]a total of 80 specimens were fabricated and tested under double-lap direct shear. It is mainly concluded that: (a, incluyendo deslaminación entre las fibras y la matriz (y consecuente fallo del sistema como material compuesto); el fallo de adherencia en la interfaz fibras-matriz es provocado por el deslizamiento de las fibras respecto a la matriz, manteniéndose esta última adherida al soporte, y ha sido señalado como el más frecuente en ensayos con FRCM [25]. Cabe señalar aquí la dificultad de elaborar modelos predictivos para refuerzos de matriz cementosa, por las variaciones en dosificación del mortero, tipo de fibras y tipo de configuración geométrica de las mismas en el tejido. A pesar de ello, diversos autores han propuesto estimaciones de la longitud efectiva de adherencia y resistencia de adherencia, en función de sus resultados experimentales [26,27], con elementos finitos [28].

La Figura 1 muestra los fallos típicos de adherencia en FRP (a) y en FRCM (b).

Algunos autores han destacado que el modo de fallo en FRCM depende en gran medida del número de capas de fibras del refuerzo [25,26,29,30], mejorándose la interacción con la matriz con mayor cuantía de fibras, lo que es un indicio de una posible forma de combatir el fallo prematuro por despegue de la interfaz fibras-matriz.

Para refuerzos de FRCM, la normativa de diseño es la ACI 549.4R [31], que propone una limitación análoga a la del FRP en términos de deformación unitaria máxima, pero más restrictiva por las incertidumbres propias del tipo de material y modo de fallo (0.012).

3. SISTEMAS DE ANCLAJE EN REFUERZOS DE FRP Y FRCM

Las técnicas de anclajes para FRP han sido comentadas de forma exhaustiva en [22,23]. Pueden distinguirse dos tipos de sistemas de anclaje: externos y embebidos (ver material suplementario). Los sistemas externos incluyen los anclajes tipo parche [32] y los encamisados en U, que han sido utilizados para prevenir el despegue de refuerzos inferiores principalmente en vigas de hormigón armado. Las técnicas embebidas suelen lograr un mayor incremento de la resistencia máxima, e incluyen: anclajes con pernos metálicos, llaves de cortante, anclajes con barras embebidas en el extremo del refuerzo (que queda enrollado alrededor de la propia barra), y anclajes de FRP.

La tecnología de anclajes nacida de los anclajes de FRP, aplicada a refuerzos de matriz cementosa, fue objeto de un primer

artículo [4] en el que se trataron las especificidades propias del cambio de material de matriz, empleando tejido de fibra de basalto y conservando las fibras transversales de la zona del abanico.

Merece particular atención el hecho de que, al nacer la tecnología de anclajes para refuerzos FRCM de las experiencias previas con FRP, los anclajes de fibras han sido utilizados, prácticamente de forma indistinta, con adhesivo polimérico y cementoso en el tramo embebido. Esto dificulta considerablemente la creación de un corpus de conocimiento específico de anclajes de FRP y anclajes textiles, con adhesivo cementoso.

4. FORMA DE TRABAJO DE ANCLAJES EN FRP Y FRCM

Tanto los anclajes de FRP para refuerzos de matriz polimérica como los anclajes textiles y de FRP para matriz cementosa han mostrado elevada eficacia en la mejora de la resistencia de los respectivos refuerzos. Sin embargo, la forma de trabajo y por tanto los mecanismos resistentes que movilizan los anclajes difiere notablemente en función del material de matriz.

Las contribuciones sobre anclajes de refuerzos de FRP son más numerosas, y pueden clasificarse en función de si estudian: anclajes aislados [33–35]; tejidos anclados ensayados a corte simple o doble adheridos o sin adherir; soluciones constructivas tales como vigas, losas o soportes [36–39]. Adicionalmente, algunos autores tratan la mejora alcanzada con anclajes múltiples [40,41].

De estas campañas experimentales se ha obtenido un conocimiento considerable de la respuesta de refuerzos de FRP anclados, si bien la aparición de modelos predictivos es bastante reciente. En este sentido, el primer artículo en abordar la resistencia unitaria de anclajes de FRP es el de Kim y Smith [54], el cual ha tenido una gran aceptación por parte de la comunidad científica. En los últimos tres años han aparecido los primeros modelos predictivos y de diseño para resistencia unitaria anclajes de FRP a cortante y para refuerzos de FRP anclajes [42–44].

En el caso de los refuerzos FRCM, la investigación de sistemas de anclajes ha estado centrada principalmente en soluciones constructivas completas, con diversos patrones geométricos para la distribución de anclajes, tales como las contribuciones de [1,3,8–10,30,45–47]. Esto ha dificultado el estudio independiente de la contribución de anclajes, para su comparación directa con los refuerzos de FRP. Sin embargo, sí existen contribuciones que han estudiado de forma comparativa el refuerzo de elementos estructurales con FRP y FRCM, de los que se pueden inferir algunos aspectos específicos del anclaje de refuerzos con matriz cementosa. Un ejemplo notable es [48], quienes compararon anclajes con tramo embebido adherido con epoxi y mortero, para refuerzos de FRP y FRCM; la principal conclusión es que la efectividad de los anclajes era muy superior en refuerzos de FRP, y que el uso de material cementoso para adherencia de los anclajes al soporte obtenía una eficacia 15% inferior a la de los anclajes impregnados con epoxi.

4.1. RESISTENCIA DE ANCLAJES DE FIBRAS (IMPREGNADOS CON POLÍMEROS)

A día de hoy, no existen publicaciones que refieran la resistencia unitaria de anclajes con mortero en el tramo embebido, por lo que el presente apartado se centra en los esfuerzos para caracterizar el comportamiento de los denominados anclajes de FRP.

La resistencia unitaria de anclajes de fibras depende de la configuración geométrica y patrón de cargas [38], por lo que su forma de trabajo depende del ángulo de inserción. Diversos autores han reseñado la reducción de capacidad resistente cuando los anclajes tienen tramo de doblado [4,35,36].

La resistencia unitaria de los anclajes es determinada por su modo de fallo. Para anclajes trabajando a tracción (sin radio de doblado), los modos de fallo son los mismos que se han observado tradicionalmente para anclajes adherentes [49]. Cuando existe un tramo de doblado, se produce una concentración de tensiones en esa zona que puede conllevar un fallo prematuro. Los modos de fallo más comunes en refuerzos anclados con anclajes de FRP se recogen en la Figura 2.

El modelo de Kim y Smith [50] trata el fallo adherente y el fallo a tracción, desarrollando ecuaciones basadas en modelos existentes para anclajes adheridos. En este sentido, y de forma análoga a los anclajes químicos, la resistencia de adherencia dependerá del material empleado como adhesivo.

En cuanto al fallo por doblado, dos de los modelos existentes para resistencia de anclajes de FRP en refuerzos sometidos a flexión y cortante incluyen la reducción de resistencia por concentración de tensiones en el tramo de doblado [42,43]. En ambos casos se parte del conocimiento relativo a refuerzos internos de fibra de carbono y de vidrio, realizando modificaciones para tener en cuenta la falta de confinamiento del tramo del abanico y profundidad embebida, entre otros.

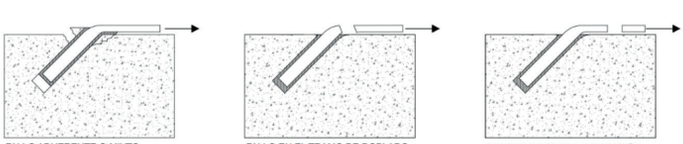


Figura 2: Modos de fallo para anclajes de FRP

4.2. CONTRIBUCIÓN DE LOS ANCLAJES A LA RESISTENCIA DE REFUERZOS ANCLADOS

En anclajes de FRP, siguiendo los modos de ensayo (cortante simple y doble) más comunes en refuerzos adheridos, los autores han comparado generalmente los resultados de tejidos adheridos con tejidos adheridos y anclados, sometidos a cortante, con diversas configuraciones de anclajes. Entre los trabajos que abordan esta cuestión cabe señalar: Breña y McGuirk [51]. Puede aceptarse, de forma simplificada, que la resistencia aportada por el anclaje puede obtenerse como la resta de la carga máxima del refuerzo anclado menos la resistencia de adherencia. En el caso de anclajes múltiples, la relación es mucho más compleja al incluir variables tales como el espaciamiento y la configuración geométrica, según puede extraerse de contribuciones como [41,52,53].

En refuerzos de FRCM existe una base de datos más heterogénea y, como se ha señalado anteriormente, la mayoría de ensayos se han realizado en soluciones estructurales completas. Tetta et al. [10] observaron que en refuerzos de FRCM el modo de fallo se alteraba en función del número de capas de tejido en el refuerzo, es decir, de la cuantía de fibras; los autores atribuyeron la mejora con múltiples capas al mecanismo adherente movilizado entre ellas, que reduce la fisuración.

Tzoura y Triantafillou [54] observaron una mejora notable en encamisados en U con la inclusión de anclajes. Por su parte, Koutas et al. [4] ensayaron paños de fábrica con refuerzo de FRCM y anclajes textiles, que compararon con refuerzos sin anclar; sus resultados relacionan directamente el número de capas en las zonas críticas para la transmisión de tensiones con la eficacia del refuerzo.

Las investigaciones reseñadas señalan adecuadamente la forma de trabajo de los anclajes en este tipo de refuerzos: no solamente mejoran la transferencia de tensiones del refuerzo al soporte, como en refuerzos de FRP, sino que incrementan la cuantía de fibras en zonas determinadas mejorando el comportamiento monolítico del

material. En particular, los resultados de Tetta y Bournas [3] para refuerzos en vigas a altas temperaturas destacan que, pese al fallo de la resina adherente de los anclajes al soporte, los elementos anclados mejoraron un 80% la eficacia respecto a los simplemente adheridos, como consecuencia de la mayor cuantía de fibras en las zonas de abanico de los anclajes. Este tipo de fenómeno se ve favorecido por la inclusión de múltiples anclajes, situación común en refuerzos de FRCM. Los ensayos realizados por Marcinczak et al. [55] también apuntan a la mejora conseguida gracias a los anclajes en el modo de trabajo y retraso del fallo en la interfaz fibras-matriz, pudiéndose alcanzar mayores deformaciones unitarias, en vigas reforzadas con fibras de PBO en matriz cementosa.

Se comenta a continuación el incremento de resistencia conseguido por anclajes en FRCM y FRP, partiendo de los resultados de [4] para FRCM ya que dentro de la literatura presentan resultados específicos de aporte de anclajes en FRCM y de los propios autores para FRP [56], en los que se han empleado parámetros de la literatura para el diseño de los propios anclajes. Los ensayos cuyos resultados recoge la figura 3b corresponden a una campaña experimental llevada a cabo por los autores con ensayo de corte simple en probetas de hormigón con refuerzos anclados ubicando el anclaje en tres posiciones diferentes respecto al extremo cargado y estudiando la disposición de su tramo libre sobre el refuerzo y entre dos capas. Los resultados en términos de incremento de resistencia de probetas ancladas (Pmáx) respecto a serie de control (Pmáx C) se muestran en la figura 3. La elección de comparar estos ensayos concretamente se debe al tipo de ensayo, a la disposición de un único anclaje por tejido y a la existencia de probetas control para cada configuración en FRCM y FRP.

Desde el punto de vista cuantitativo la comparación de resultados en FRCM y FRP indica que la mejora en refuerzos anclados de una capa es similar en ambos casos, mientras que es al menos un 40% superior en FRP cuando se comparan refuerzos anclados de dos capas.

En la Figura 3a se recogen los resultados de refuerzos de una capa (izquierda) y dos capas (derecha) de FRCM con anclajes. Puede apreciarse que el aporte de resistencia de los anclajes es menos significativo con dos capas, debido a la mayor resistencia de las probetas de control con dos capas de refuerzo. El modo de fallo de las probetas control en esta campaña experimental fue por rotura de fibras es cremallera consecuente de la fisuración de la matriz y fallo de monolitismo del sistema. En el caso de los refuerzos anclados el fallo se inició por deslizamiento del abanico del anclaje seguido por fallo en el refuerzo o en el tramo de doblado del anclaje. Los resultados según puede apreciarse por el modo de fallo y por la Figura 3a), sugieren que los anclajes en FRCM están actuando como una capa adicional de refuerzo siendo por ello su aprovechamiento mayor cuanto menor es el número de capas originales, retrasando el deslizamiento fibras matriz. Sin embargo, con el diseño de esta campaña experimental no se ha conseguido evitar el deslizamiento del abanico por ser el punto más débil del refuerzo.

Con respecto a los refuerzos anclados de FRP (Figura 3b) se observa que la tendencia se invierte y el aprovechamiento es mayor para refuerzos con el abanico del anclaje instalado entre dos capas. Estos resultados se relacionan con el modo de fallo que fue frágil para refuerzos de una capa fallando la interacción refuerzo-abanico de anclaje, y dúctil para refuerzos con dos capas consiguiendo un mayor aprovechamiento de la capacidad unitaria del anclaje (por rotura de anclaje en el tramo de doblado o arrancamiento del mismo).

Es preciso mencionar que las condiciones de los ensayos arriba comentados, difieren notablemente, por lo que las observaciones deben ser tomadas con precaución. Sin embargo, si es posible extraer como conclusión que los fenómenos implicados en el comportamiento en los dos tipos de refuerzo impiden el empleo de un criterio único de diseño para anclajes en FRP y FRCM. Los mecanismos de fallo se entienden como la ilustración más clara de los elementos a optimizar para cada caso.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha realizado una descripción y análisis de las investigaciones precedentes en materia de refuerzo estructural con materiales compuestos, tanto con matriz polimérica (FRP) como con matriz cementosa (FRCM), destacando la comparativa entre la aplicación de anclajes tipo *spike anchor* a uno y otro sistema.

Los sistemas de anclaje son beneficiosos para el comportamiento general de los refuerzos con materiales compuestos, permitiendo alcanzar una mayor eficiencia del sistema con mayores resistencias máximas.

El FRCM aparece como una alternativa válida al FRP, especialmente para la rehabilitación y refuerzo de estructuras de fábrica o con una resistencia del soporte moderada o baja. El comportamiento de los refuerzos de FRCM difiere significativamente del de los refuerzos de FRP, lo que puede condicionar los mecanismos de transferencias de tensiones y eficacia de los sistemas de anclaje.

Los resultados obtenidos por los autores en FRP demuestran que la presencia de anclajes produce un incremento en la tensión de adherencia entre el 50 y el 154% dependiendo de su configuración. Por su parte, en base a los resultados de la bibliografía para FRCM esta mejora está limitada al 9-110%. La mejora en resistencia de FRCM alcanzada con ayuda de anclajes se ha relacionado, en la literatura, con la mitigación de la degradación de la adherencia fibras-matriz, que suele ser limitante en este tipo de refuerzos.

A fecha de hoy, existen escasos modelos numéricos (no incluidos en guías de diseño) para anclajes de FRP, y no se ha publicado ningún modelo equivalente en refuerzos de matriz cementosa; esto ha sido motivado, entre otros factores, porque la mayoría de investigaciones con FRCM se han realizado ensayando elementos estructurales, en lugar de probetas estandarizadas.

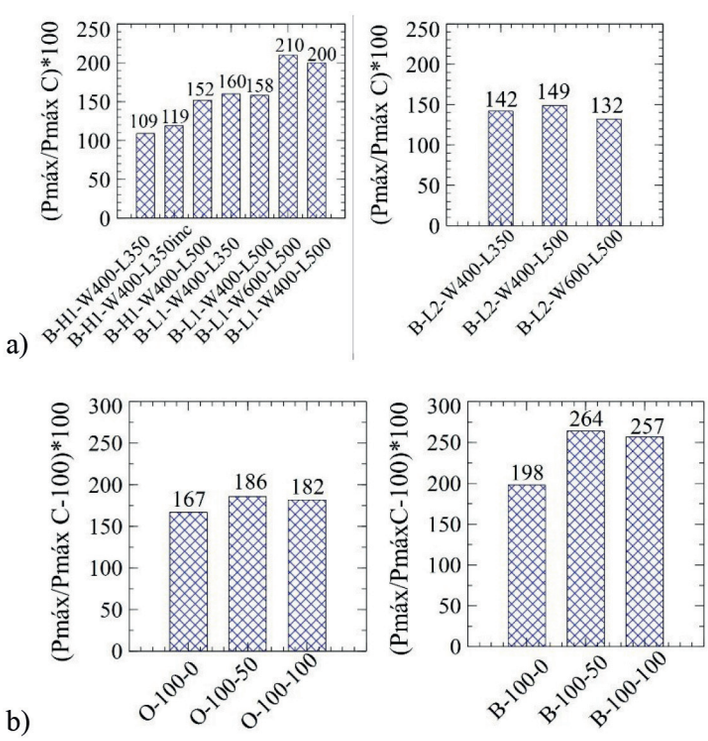


Figura 3 a) Incremento de resistencia FRCM [4] b) Incremento resistencia FRP (por los autores) {Formatting Citation}

En función de los datos disponibles, puede concluirse que los anclajes en este tipo de refuerzo funcionan más como una capa adicional de fibras que refuerza la zona crítica para la transferencia de tensiones que como un mecanismo de anclaje independiente que simplemente traslada las tensiones al soporte, como ocurre en los refuerzos de FRP. Los autores consideran crucial esta diferencia, y la observada en los modos de fallo de refuerzos anclados de FRP y FRCM, que deben focalizar futuras investigaciones para el diseño de estos sistemas.

REFERENCIAS

[1] A. D'Ambrisi, F. Focacci, R. Luciano, V. Alecci, and M. De Stefano, "Carbon-FRCM materials for structural upgrade of masonry arch road bridges," Compos. Part B Eng., 2015. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.01.024)
[2] J. P. Firmo, J. R. Correia, and L. A. Bisby, "Fire behaviour of FRP-strengthened reinforced concrete structural elements: A state-of-the-art review," Compos. Part B Eng., 2015. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.05.045)
[3] Z. C. Tetta and D. A. Bournas, "TRM vs FRP jacketing in shear strengthening of concrete members subjected to high temperatures," Compos. Part B Eng., 2016. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.026.)
[4] L. Koutas, A. Pitytzogia, T. C. Triantafillou, and S. N. Bousias, "Strengthening of Infilled Reinforced Concrete Frames with TRM: Study on the Development and Testing of Textile-Based Anchors," J. Compos. Constr., 2013. (doi: https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000390.)
[5] A. D'Ambrisi, L. Feo, and F. Focacci, "Experimental analysis on bond between PBO-FRCM strengthening materials and concrete," Compos. Part B Eng., 2013. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.03.011.)
[6] A. D'Ambrisi, L. Feo, and F. Focacci, "Bond-slip relations for PBO-FRCM materials externally bonded to concrete," Compos. Part B Eng., 2012. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.06.002.)
[7] T. C. Triantafillou, Textile Fibre Composites in Civil Engineering. 2016. (doi: https://doi.org/10.1016/C2014-0-01415-3.)
[8] L. Garmendia, P. Larrinaga, R. San-Mateos, and J. T. San-José, "Strengthening masonry vaults with organic and inorganic composites: An experimental approach," Mater. Des., 2015. (doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.150.)
[9] L. Garmendia, J. T. San-José, D. Garcia, and P. Larrinaga, "Rehabilitation of masonry arches with compatible advanced composite material," Constr. Build. Mater., 2011. (doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.065.)
[10] Z. C. Tetta, L. N. Koutas, and D. A. Bournas, "Textile-reinforced mortar (TRM) versus fiber-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams," Compos. Part B Eng., 2015. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.055.)
[11] J. Yao, J. G. Teng, and J. F. Chen, "Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints," Compos. Part B Eng., 2005. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.06.001.)
[12] K. V. Subramaniam, C. Carloni, and L. Nobile, "Width effect in the interface fracture during shear debonding of FRP sheets from concrete," Eng. Fract. Mech., 2007. (doi: https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.09.002.)
[13] J. F. Chen and J. G. Teng, "Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete," J. Struct. Eng., 2001. (doi: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(784).)
[14] J. G. Teng, J. F. Chen, and S. T. Smith, "Debonding Failures in FRP-Strengthened RC Beams: Failure Modes, Existing Research and Future Challenges," 2008. (doi: https://doi.org/10.1061/40596(264)16.)
[15] M. Angelillo, E. Babilio, L. Cardamone, A. Fortunato, and M. Lippiello, "Some remarks on the retrofitting of masonry structures with composite materials," Compos. Part B Eng., 2014. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.025.)
[16] R. Fedele and G. Milani, "Assessment of bonding stresses between FRP sheets and masonry pillars during delamination tests," Compos. Part B Eng., 2012. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.080.)
[17] F. Ceroni, B. Ferracuti, M. Pecce, and M. Savoia, "Assessment of a bond strength model for FRP reinforcement externally bonded over masonry blocks," Compos. Part B Eng., 2014. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.028.)
[18] Fib, Bulletin 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. 2001.
[19] CNR-DT 200 R1-2013,2013
[20] TR55 Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials., "Concr. Soc.,2012
[21] American Concrete Institute. ACI 440.2R-17,2017.
[22] R. Kalfat, R. Al-Mahaidi, and S. T. Smith, "Anchorage Devices Used to Improve the Performance of Reinforced Concrete Beams Retrofitted with FRP Composites: State-of-the-Art Review," J. Compos. Constr., vol. 17, no1, pp. 14-33, 2011. (doi: https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000276.)
[23] S. V. Grelle and L. H. Sneed, "Review of Anchorage Systems for Externally Bonded FRP Laminates," Int. J. Concr. Struct. Mater., vol. 7, no. 1, pp. 17–33, 2013. (doi: https://doi.org/10.1007/s40069-013-0029-0.)
[24] S. M. Raoof, L. N. Koutas, and D. A. Bournas, "Bond between textile-reinforced mortar (TRM) and concrete substrates: Experimental investigation," Compos. Part B Eng., 2016. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.05.041.)
[25] L. N. Koutas, Z. Tetta, D. A. Bournas, and T. C. Triantafillou, "Strengthening of Concrete Structures with Textile Reinforced Mortars: State-of-the-Art Review," J. Compos. Constr., 2018. .(doi: https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000882.)
[26] S. M. Raoof, L. N. Koutas, and D. A. Bournas, "Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams," Constr. Build. Mater., 2017. (doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.023.)
[27] F. Bencardino, C. Carloni, A. Condello, F. Focacci, A. Napoli, and R. Realfonzo, "Flexural behaviour of RC members strengthened with FRCM: State-of-the-art and predictive formulas," Compos. Part B Eng., 2018. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.051.)
[28] E. Grande and G. Milani, "Interface modeling approach for the study of the bond behavior of FRCM strengthening systems," Compos. Part B Eng., 2018. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.052.)
[29] S. Babaeidarabad, G. Loreto, and A. Nanni, "Flexural Strengthening of RC Beams with an Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix," J. Compos. Constr., 2014. (doi: https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000473.)
[30] U. Ebead, K. C. Shrestha, M. S. Afzal, A. El Refai, and A. Nanni, "Effectiveness of Fabric-Reinforced Cementitious Matrix in Strengthening Reinforced Concrete Beams," J. Compos. Constr., 2016. (doi:10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000741.)
[31] ACI 549.4R-13, 2013
[32] R. Kalfat and R. Al-Mahaidi, "Improvement of FRP-to-concrete bond performance using bidirectional fiber patch anchors combined with FRP spike anchors," Compos. Struct., 2016. (doi:10.1016/j.compstruct.2016.08.010)
[33] S. J. Kim and S. T. Smith, "Pull-Out Tests on Frp Anchors," Proc. Asia-Pacific Conf. FRP Struct., no. Apfis, pp. 775–782, 2007.
[34] T. Ozbakkaloglu and M. Saatcioglu, "Tensile Behavior of FRP Anchors in Concrete," J. Compos. Constr., vol. 13, no. 2, pp. 82–92, 2009. (doi: https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2009)13:2(82))
[35] P. V. Llauradó, J. Fernández-Gómez, and F. J. González Ramos, "Influence of geometrical and installation parameters on performance of CFRP anchors," Compos. Struct., vol. 176, pp. 105–116, 2017. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.05.035.)
[36] H. W. Zhang and S. T. Smith, "Influence of FRP anchor fan configuration and dowel angle on anchoring FRP plates," Compos. Part B Eng., vol. 43, no. 8, pp. 3516–3527, 2012. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.11.072.)
[37] H. W. Zhang and S. T. Smith, "FRP-to-concrete joint assemblages anchored with multiple FRP anchors," Compos. Struct., vol. 94, no. 2, pp. 403–414, 2012. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.07.025.)
[38] T. Ozbakkaloglu, C. Fang, and A. Gholampour, "Influence of FRP anchor configuration on the behavior of FRP plates externally bonded on concrete members," Eng. Struct., vol. 133, pp. 133–150, 2017. (doi: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.005.)
[39] P. Villanueva Llauradó, "Influencia de las condiciones de ejecución en la resistencia de anclajes de fibra de carbono para refuerzos en estructuras de hormigón," Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
[40] N. Eshwar, A. Nanni, and T. J. Ibell, "Performance of two anchor systems of externally bonded fiber-reinforced polymer laminates," ACI Mater. J., vol. 105, no. 1, pp. 72–80, 2008.
[41] C. W. Niemitz, "Anchorage of carbon fiber reinforced polymers to reinforced concrete in shear applications," University of Massachustetts Amherst, 2008.
[42] P. Villanueva Llauradó, T. Ibell, J. Fernández Gómez, and F. J. González Ramos, "Pull-out and shear-strength models for FRP spike anchors," Compos. Part B Eng., vol. 116, pp.239-252, 2017. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.029.)
[43] W. Sun, H. Liu, Y. Wang, and T. He, "Impacts of configurations on the strength of FRP anchors," Compos. Struct., 2018. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.020.)
[44] E. del Rey Castillo, D. Dizhur, M. Griffith, and J. Ingham, "Experimental testing and design model for bent FRP anchors exhibiting fiber rupture failure mode," Compos. Struct., 2019. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.091.)
[45] N. Gattesco and I. Boem, "Characterization tests of GFRM coating as a strengthening technique for masonry buildings," Compos. Struct., 2017. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.01.043.)
[46] E. Bernat-Maso, C. Escrig, C. A. Aranha, and L. Gil, "Experimental assessment of Textile Reinforced Sprayed Mortar strengthening system for brickwork wallettes," Constr. Build. Mater., 2014. (doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.031.)
[47] V. Alecci, M. De Stefano, R. Luciano, L. Rovero, and G. Stipo, "Experimental Investigation on Bond Behavior of Cement-Matrix–Based Composites for Strengthening of Masonry Structures," J. Compos. Constr., 2015. (doi: https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000598.)
[48] D. A. Bournas, A. Pavese, and W. Tizani, "Tensile capacity of FRP anchors in connecting FRP and TRM sheets to concrete," Eng. Struct., 2015. (doi:10.1016/j.engstruct.2014.10.031.)
[49] F. González, J. Fernández, G. Agranati, and P. Villanueva, "Influence of construction conditions on strength of post installed bonded anchors," Constr. Build. Mater., 2018. (doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.144.)
[50] S. J. Kim and S. T. Smith, "Pullout Strength Models for FRP Anchors in Uncracked Concrete," J. Compos. Constr., 2010. (doi:10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000097.)
[51] S. F. Breña and G. N. McGuirk, "Advances on the Behavior Characterization of FRP-Anchored Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Sheets Used to Strengthen Concrete Elements," Int. J. Concr. Struct. Mater., 2013. (doi: https://doi.org/10.1007/s40069-013-0028-1.)
[52] H. W. Zhang, S. T. Smith, and S. J. Kim, "Optimisation of carbon and glass FRP anchor design," Constr. Build. Mater., vol. 32, pp. 1–12, 2012. (doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.100.)
[53] S. L. Orton, J. O. Jirsa, and O. Bayrak, "Design Considerations of Carbon Fiber Anchors," J. Compos. Constr., vol. 12, no. 6, pp. 608–616, 2008. (doi: https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:6(608).)
[54] E. Tzoura and T. C. Triantafillou, "Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets," Mater. Struct. Constr., 2016. (doi: https://doi.org/10.1617/s11527-014-0470-9.)
[55] T. Trapko, D. Urbańska, and M. Kamiński, "Shear strengthening of reinforced concrete beams with PBO-FRCM composites," Compos. Part B Eng., 2015. (doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.05.024).
[56] A. Cortez, J. Fernández, and P. Villanueva, "Advances in FRP anchoring systems for externally bonded carbon fibre reinforcements," in CITE, 2019, pp. 106–108.
[57] H. Zhang, S. T. Smith, R. J. Gravina, and Z. Wang, "Modelling of FRP-concrete bonded interfaces containing FRP anchors," Constr. Build. Mater., 2017. (doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.080.)

MATERIAL SUPLEMENTARIO

https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/9242-1.pdf